

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑪ **DE 3602496 A1**

⑤1 Int. Cl. 4:
H02 M 7/44
H 02 M 7/525

②1 Aktenzeichen: P 36 02 496.1
②2 Anmeldetag: 28. 1. 86
④3 Offenlegungstag: 30. 7. 87

DE 3602496 A1

⑦1 Anmelder:

Elektro-Geräte-Bau Gustav Klein GmbH & Co KG,
8920 Schongau, DE

⑦4 Vertreter:

Blumbach, P., Dipl.-Ing., 6200 Wiesbaden; Weser,
W., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat.; Kramer, R., Dipl.-Ing.,
8000 München; Zwirner, G., Dipl.-Ing.
Dipl.-Wirtsch.-Ing., 6200 Wiesbaden; Hoffmann, E.,
Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 8000 München

⑦2 Erfinder:

Holtz, Joachim, Prof. Dr.-Ing., 5600 Wuppertal, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zum Parallelbetrieb von Wechselrichtern und Wechselrichteranordnung zur Durchführung des Verfahrens

Bei einer Wechselrichteranordnung mit n parallel betriebenen Wechselrichtern werden $(n-1)$ die addierten Ausgangsströme der Wechselrichter so geregelt, daß die Phasen der Ausgangsströme aller n Wechselrichter im wesentlichen übereinstimmen und ihre Beträge je das $1/n$ -fache des Betrages des Summenstroms sind.

DE 3602496 A1

1. Verfahren zum Parallelbetrieb von n Wechselrichtern, bei dem die Ausgangsströme der n Wechselrichter ($WR1$ bis $WR3$) addiert werden, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Ausgangsströme von ($n-1$) der Wechselrichter ($WR1$ bis $WR3$) so geregelt werden, daß die Phasen der Ausgangsströme aller n Wechselrichter im wesentlichen übereinstimmen und ihre Beträge je das $1/n$ -fache des Betrages des Summenstroms sind.

2. Wechselrichteranordnung, umfassend n Wechselrichter ($WR1$ bis $WR3$), von denen jeder einen eigenen Spannungsregler ($CV1$ bis $CV3$) aufweist, zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch Meßeinrichtungen (12, 13, 14) zur Erfassung der Ausgangsströme aller n Wechselrichter ($WR1$ bis $WR3$), eine Summiereinrichtung (20) zur Bildung eines Summenstromes entsprechend der Summe der erfaßten Ausgangsströme, eine Teilungseinrichtung (21) zur Erzeugung eines Strombezugssignals, das dem durch n geteilten Summenstrom entspricht, eine Stromsollwertbildungseinrichtung (22, 23) zur Erzeugung eines Stromsollwertes entsprechend dem Betrag derjenigen Komponente des Strombezugssignals, deren Phase gleich einer Bezugsphase ist, Stromistwertbildungseinrichtungen (26, 28; 27, 29) zur Bildung von ($n-1$) Stromistwerten, von denen jeder dem Betrag derjenigen Komponente des Ausgangsstromes eines jeweils anderen von ($n-1$) der Wechselrichter ($WR1$ bis $WR3$) entspricht, deren Phase gleich der Bezugsphase ist, und ($n-1$) Lastverteilungsregler ($CL1$, $CL2$), von denen jeder mit der Differenz zwischen dem Stromsollwert und einem jeweils anderen der Stromistwerte beaufschlagt ist und mit einem Ausgangssignal den Spannungssollwert für den Spannungsregler ($CV2$, $CV3$) des zugeordneten Wechselrichters ($WR2$, $WR3$) steuert.

3. Wechselrichteranordnung, umfassend n Wechselrichter, von denen jeder einen eigenen Spannungsregler aufweist, zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch Meßeinrichtungen zur Erfassung der Ausgangsströme aller n Wechselrichter, ($n-1$) Phasenvergleichseinrichtungen zur Erzeugung eines jeweiligen Phasendifferenzsignals entsprechend der Phasendifferenz zwischen dem Ausgangsstrom eines ersten der n Wechselrichter und dem Ausgangsstrom eines i -ten Wechselrichters ($i = 2$ bis n) und ($n-1$) Lastverteilungsregler, von denen jeder mit dem Ausgangssignal einer jeweils anderen der Phasenvergleichseinrichtungen beaufschlagt wird und mit seinem Ausgangssignal den Spannungssollwert für den Spannungsregler des zugeordneten Wechselrichters steuert.

4. Wechselrichteranordnung nach Anspruch 2 oder 3, gekennzeichnet durch einen gemeinsamen Ausgangstransformator (Tr) mit n Primärwicklungen ($Pw1$, $Pw2$, $Pw3$) gleicher Windungszahl, von denen jede von einem anderen der n Wechselrichter ($WR1$ bis $WR3$) gespeist wird, wobei ein der Ausgangsspannung an der gemeinsamen Sekundärwicklung (Ws) des Ausgangstransformators (Tr)

entsprechendes Signal als Spannungssollsignal den Spannungsreglern ($CV1$ bis $CV3$) der n Wechselrichter zugeführt wird.

5. Wechselrichteranordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß jedem Wechselrichter eine Magnetisierungsstrommeßeinrichtung (11 bis 17) zur Erfassung des Magnetisierungsstromanteils im Ausgangsstrom des Wechselrichters sowie eine Gleichstromunterdrückungseinrichtung (18, 19, $CI1$ bis $CI3$) zugeordnet ist, durch die eine Gleichstromkomponente im Magnetisierungsstromanteil unterdrückbar ist.

6. Wechselrichteranordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetisierungsstrommeßeinrichtung umfaßt: eine Einrichtung (11) zum Messen des Sekundärstromes des Ausgangstransformators (Tr), eine Teilungseinrichtung (12) zum Teilen des gemessenen Sekundärstroms durch $n \cdot \bar{u}$, wenn \bar{u} das Übersetzungsverhältnis des Ausgangstransformators (Tr) ist; eine Einrichtung (15 bis 17) zur Bildung der Differenz zwischen dem Ausgangsstrom des jeweiligen Wechselrichters ($WR1$ bis $WR3$) und dem durch n geteilten Sekundärstrom.

7. Wechselrichteranordnung nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß ein Phasenschieber (19) zur Erzeugung eines dem Spannungssollsignal (u^*) für die Spannungsregler ($CV1$ bis $CV3$) der Wechselrichter ($WR1$ bis $WR3$) um 90° nacheilenden Magnetisierungsstrom-Sollsignals vorgesehen ist und daß die Gleichstromunterdrückungseinrichtung ein Magnetisierungsstromregler ($CI1$ bis $CI3$) ist, der mit der Differenz zwischen dem Magnetisierungsstrom-Sollsignal und dem Magnetisierungsstrom-Istsignal beaufschlagt wird und dessen Ausgangssignal dem Spannungssollsignal für den Spannungsregler des jeweiligen Wechselrichters überlagert wird.

8. Wechselrichteranordnung nach Anspruch 2 oder einem der Ansprüche 4 bis 7 in Verbindung mit Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Stromsollwertbildungseinrichtung und die Stromistwertbildungseinrichtung getastete Doppelweggleichrichter (22, 26, 27) umfassen, die von einem die Bezugsphase aufweisenden Steuersignal getastet werden und denen ein Tiefpassfilter (23, 28, 29) nachgeschaltet ist.

9. Wechselrichteranordnung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Bezugsphase eine der Phase der Grundschiwingung der Ausgangsspannung eines der Wechselrichter ($WR1$ bis $WR3$) um 45° bis 135° , vorzugsweise um 90° , nacheilende Phase ist.

10. Wechselrichteranordnung nach einem der Ansprüche 2 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß ein Filterkondensator (C) parallel zu den Ausgangsklemmen (1, 2) der Wechselrichteranordnung geschaltet ist und ein dem Strom durch den Filterkondensator (C) entsprechendes Signal (i_c) von den Ausgangssignalen der Spannungsregler ($CV1$ bis $CV3$) der Wechselrichter ($WR1$ bis $WR3$) subtrahiert wird.

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Parallelbetrieb von n Wechselrichtern sowie eine Wechselrichter-

anordnung zur Durchführung dieses Verfahrens.

Es gibt Anwendungsbereiche, bei denen man Wechselrichter hoher Leistung (50 kVA und mehr) benötigt, die hohen dynamischen Anforderungen genügen. Als bevorzugtes Beispiel für derartige Anwendungsbereiche seien statische unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen genannt, die dort eingesetzt werden, wo selbst kurzzeitige Netzunterbrechungen oder andere Netzstörungen zum Ausfall oder zur Fehlfunktion wichtiger Anlagen führen können.

Thyristorwechselrichter lassen sich heute für sehr hohe Leistungen herstellen. Schwierigkeiten bereitet es bei ihnen aber, mit vertretbarem Aufwand für die Steuerelektronik das beispielsweise für unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen erforderliche dynamische Verhalten zu erzielen. In den letzten Jahren hat man daher zunehmend auf inzwischen entwickelte Leistungstransistoren als Ventile für derartige Wechselrichter zurückgegriffen. Es stehen heute Leistungstransistoren zur Verfügung, die Ströme bis zu 300 Ampere schalten können. Dabei lassen sich mit diesen Leistungstransistoren ohne größeren Aufwand höhere Schaltfrequenzen als mit Thyristoren erzielen, so daß man mit Leistungstransistoren heute Wechselrichter bis zu 15 kVA (einphasig) herstellen kann, die hohen Anforderungen an das dynamische Verhalten genügen. Für manchen Anwendungsfall reicht diese Leistung nicht aus, so daß nach Wegen gesucht wurde, mit den dynamisch hervorragenden Transistorwechselrichtern höhere Leistungen zu erreichen.

Aus der Druckschrift IEEE Transactions On Industry Applications, Band IA-20, Nr. 4, Juli/August 1984, Seiten 961 bis 966, ist eine Wechselrichteranordnung mit Leistungstransistoren für den Einsatz in unterbrechungsfreien Stromversorgungsanlagen bekannt, die eine Ausgangsleistung von bis zu 100 kVA besitzt. Der Leistungsteil dieser Wechselrichteranordnung enthält zwei 3-Phasen-Brückenschaltungen, die mit einer Phasendifferenz von 30° betrieben werden, eingangsseitig parallel an eine Gleichstromquelle angeschlossen sind und ausgangsseitig je einen gesonderten Ausgangstransformator speisen. Die Sekundärwicklungen der Ausgangstransformatoren, von denen die des einen in Sternschaltung und die des anderen in Zickzackschaltung ausgebildet sind, sind in Reihe geschaltet. Zur Erzielung der hohen Leistungen sind bei dieser bekannten Wechselrichteranordnung bis zu sechs Leistungstransistoren zur Bildung eines Ventils parallelgeschaltet. Eine solche Parallelschaltung von Transistoren setzt eine statische und dynamische Stromgleichverteilung auf alle Transistoren voraus. Damit dies erreicht werden kann, müssen nicht nur besondere schaltungstechnische Maßnahmen bezüglich Anordnung und Verdrahtung der Transistoren getroffen werden, vor allem müssen die Transistoren auch so ausgesucht werden, so daß die parallelgeschalteten Transistoren übereinstimmende Kenndaten besitzen. Der damit verbundene Aufwand führt zu enormen Herstellungskosten. Darüber hinaus muß im Fall des Versagens eines der Transistoren praktisch immer die gesamte Parallelschaltung ausgetauscht werden.

Es ist ferner bekannt, zur Erhöhung der mit Transistorwechselrichtern erzielbaren Leistung die Sekundärwicklungen von zwei oder mehr unabhängig voneinander betriebenen Wechselrichtergeräten über Ausgleichsdrosseln parallelzuschalten. Durch stets vorhandene Unsymmetrien im Steuerungs- und Leistungsteil der Wechselrichtergeräte kann bei diesem bekannten Parallelbetrieb eine vollständig symmetrische Lastauf-

teilung nicht erreicht werden. Deshalb muß eine Minderausnutzung der an sich verfügbaren Wechselrichterleistung in Kauf genommen werden.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Parallelbetrieb von Wechselrichtern zu schaffen, das bei geringem Aufwand eine vollständig symmetrische Lastaufteilung auf die einzelnen Wechselrichter erlaubt. Aufgabe der Erfindung ist ferner die Schaffung einer zur Durchführung des Verfahrens geeigneten Wechselrichteranordnung.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren nach dem Patentanspruch 1 sowie durch eine Wechselrichteranordnung gemäß dem Patentanspruch 2 bzw. 3 gelöst.

Eine direkte Parallelschaltung der Ausgangsklemmen der Brückenschaltungen von mehreren Wechselrichtern setzt voraus, daß diese Brückenschaltungen eingangsseitig von gesonderten Gleichstromquellen gespeist werden, die potentialmäßig voneinander unabhängig sind. Steht dagegen für die Gleichstromspeisung der Wechselrichterbrückenschaltungen nur eine gemeinsame Gleichstromquelle oder stehen potentialmäßig verbundene Gleichstromquellen zur Verfügung, dann ist ausgangsseitig eine Potentialtrennung erforderlich, das heißt die Ausgangsströme der Wechselrichter können nicht direkt durch Parallelschaltung der Ausgangsklemmen der Brückenschaltungen addiert werden. In diesem letzteren Fall wird daher eine indirekte Addition der Ausgangsströme gewählt. Hierzu besitzt jeder der parallel zu betreibenden Wechselrichter einen gesonderten Ausgangstransformator, wobei die Sekundärwicklungen dieser Ausgangstransformatoren parallelgeschaltet sind. Alternativ speist jeder der parallel zu betreibenden Wechselrichter eine gesonderte von einer entsprechenden Anzahl von Primärwicklungen eines gemeinsamen Ausgangstransformators, was zu einer Addition der Durchflutungen führt. Die Verwendung eines einzigen Ausgangstransformators für alle Wechselrichter bietet außer dem Vorteil, daß er billiger als jeweils gesonderte Ausgangstransformatoren für alle Wechselrichter ist, noch einen besonderen Vorteil, auf den später näher eingegangen wird.

Unabhängig davon, ob die Ausgangsströme der Wechselrichter direkt oder indirekt addiert werden, setzt die zur Erzielung einer symmetrischen Lastaufteilung notwendige Vermeidung von Ausgleichsströmen zwischen den Wechselrichtern gleiche Ausgangsspannung voraus. Da der Lastkreis jedes der parallel zu betreibenden Wechselrichter sehr niederohmig ist, erweist sich die Regelung der Ausgangsspannungen der einzelnen Wechselrichter bei wirtschaftlich vertretbarem Aufwand als problematisch, weil bereits Regelabweichungen im Genauigkeitsbereich der Istwerterfassung zu sehr hohen Stromänderungen führen würden. Die beanspruchte Erfindung löst deshalb das Problem der gleichmäßigen Lastaufteilung auf die parallel betriebenen Wechselrichter durch Regelung von deren Ausgangsströmen. Wenn bei n parallel betriebenen Wechselrichtern die Ausgangsströme von $(n-1)$ dieser Wechselrichter so geregelt werden, daß sie jeweils die gleiche Phasenlage wie der Summenstrom aus den Ausgangsströmen aller n Wechselrichter aufweisen und ihr Betrag jeweils ein n -tel des Betrags des Summenstroms ist, dann ist gewährleistet, daß keine Ausgleichsströme zwischen den Wechselrichtern fließen, sondern alle Wechselrichter gleichen Anteil am Laststrom haben.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels unter bezug auf die Zeichnungen nä-

her erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 schematisch ein Schaltbild einer Wechselrichteranordnung mit drei parallel betriebenen Wechselrichtern und

Fig. 2 ein Ersatzschaltbild und ein Zeigerdiagramm zur Erläuterung des zugrundeliegenden Prinzips.

Die in Fig. 1 dargestellte Wechselrichteranordnung enthält drei Wechselrichter $WR1$, $WR2$ und $WR3$.

Verfahren und Vorrichtung der Erfindung eignen sich grundsätzlich für eine beliebige Anzahl n von parallel zu betreibenden Wechselrichtern, und für die in Fig. 1 dargestellte und nachfolgend beschriebene Anordnung ist lediglich beispielshalber der Fall $n = 3$ gewählt. Die Wechselrichter $WR1$ bis $WR3$ weisen untereinander den gleichen Aufbau auf, so daß es ausreicht, den Wechselrichter $WR1$ stellvertretend für alle zu beschreiben. Er enthält in seinem Leistungsteil eine vollgesteuerte 1-Phasen-Brückenschaltung des üblichen und daher hier nicht im einzelnen dargestellten Aufbaus. Als Ventile sind in dieser Brückenschaltung handelsübliche 300 A Darlington-Transistormodule mit integrierten Rückwärtsdioden eingesetzt. Es sei an dieser Stelle hervorgehoben, daß das hier beschriebene Verfahren und die beschriebene Wechselrichteranordnung aus den eingangs genannten Gründen insbesondere für die schnell schaltenden, aber in ihrer Leistung begrenzten Leistungstransistoren geeignet sind. Dessenungeachtet lassen sich Verfahren und Anordnung aber auch bei Wechselrichtern einsetzen, deren Brückenschaltungen nicht Leistungstransistoren sondern Thyristoren, GTOs oder andere Schalterelemente als Ventile aufweisen.

Die Brückenschaltung $B1$ ist eingangsseitig an eine Gleichstromquelle in Form einer Batterie, eines netzgespeisten Gleichrichters oder dergleichen angeschlossen, was in der Zeichnung nicht dargestellt ist. Ausgangsseitig ist die Brückenschaltung $B1$ über eine Filterinduktivität $L1$ mit einer Primärwicklung $Pw1$ eines Ausgangstransformators Tr verbunden. Die Primärwindungen $Pw1$, $Pw2$ und $Pw3$ sind mit gleichen Windungszahlen ausgeführt, so daß für alle dasselbe Übersetzungsverhältnis \bar{u} ($\bar{u} = \text{Primärwindungszahl} : \text{Sekundärwindungszahl}$ gilt). Die Filterinduktivität $L1$ kann unter Umständen entfallen, wenn die Streuinduktivität des Ausgangstransformators Tr ausreichend groß ist. Die Sekundärwicklung Sw des Ausgangstransformators Tr ist an die Ausgangsklemmen 1, 2 der Wechselrichteranordnung angeschlossen. Parallel zu den Ausgangsklemmen 1, 2 liegt ein Filterkondensator C , der in Verbindung mit der Filterinduktivität $L1$ die Ausgangsspannung glättet. Der Ausgangstransformator Tr ist so ausgelegt, daß seine Hauptinduktivität den Grundschwingungsanteil des Stroms durch den Filterkondensator C liefert.

Der Wechselrichter $WR1$ enthält einen Spannungsregler $CV1$, der mit der Differenz zwischen einem Spannungssollsignal u_1^* und einem Spannungssignal u_c beaufschlagt wird. Das Spannungssignal wird mittels eines Trennverstärkers 3 von den Ausgangsklemmen 1, 2 abgenommen, entspricht also der Klemmenspannung u_a des Filterkondensators C , nicht der Ausgangsspannung des Wechselrichters $WR1$. Mittels einer Strommeßstelle 4 wird ein dem Kondensatorstrom durch den Filterkondensator C entsprechendes Signal i_c erfaßt und als zusätzliches Rückkopplungssignal mittels eines Addierers 5 vom Ausgangssignal des Spannungsreglers $CV1$ subtrahiert. Da der Kondensatorstrom die Ableitung der Ausgangsspannung u_a ist, wird durch diese Rückkopplung eine Verbesserung der Dynamik erreicht. Außer-

dem unterdrückt diese Rückkopplung die Schwingungsfähigkeit des aus der Hauptinduktivität des Ausgangstransformators Tr und dem Filterkondensator C gebildeten Resonanzkreises. Von dem Ausgangssignal des Addierers 5 wird mittels eines Addierers 6 ein Dreieckssignal von einem Dreiecksgenerator $CG1$ subtrahiert und die Differenz mittels eines Komparators 7 in eine pulsbreitenmodulierte Rechteckspannung für die Steuerung der Leistungstransistoren der Brückenschaltung $B1$ umgesetzt. Die Brückenschaltung arbeitet im Dreipunktbetrieb mit einer Taktfrequenz f_T von 1 kHz, wenn das Dreieckssignal eine Frequenz von 2 kHz besitzt. Wenn eine Phasenverschiebung der Dreieckssignale der Dreiecksgeneratoren der verschiedenen Wechselrichter um 120° (bei n Wechselrichtern um $360^\circ/n$) vorgesehen wird, dann verschwinden die Harmonischen der Frequenzen $2f_T$ bis $2nf_T$ in der Ausgangsspannung u_a . Dementsprechend erlaubt diese Maßnahme der Verwendung einfacherer Filtermittel und führt damit auch zu einer Verbesserung des dynamischen Verhaltens der Wechselrichteranordnung. Bei der hier beschriebenen Verwendung eines gemeinsamen Ausgangstransformators für alle Wechselrichter tritt der eingangs schon angedeutete zusätzliche Vorteil auf, daß sich die in der Ausgangsspannung u_a fehlenden Harmonischen bereits primärseitig aufheben und daher im Eisenkreis und in der Sekundärwicklung des Ausgangstransformators keine Verluste verursachen.

Das Spannungssollsignal für die einzelnen Wechselrichter $WR1$ bis $WR3$ wird auf folgende Weise gebildet. Ein Referenzsignalgenerator RS erzeugt ein sinusförmiges Referenzsignal, dessen Frequenz f^* vorgebar ist. Die Amplitude dieses sinusförmigen Signals wird mittels eines Multiplizierers 8 vom Ausgangssignal eines Effektivwertreglers CVe gesteuert. Der Effektivwertregler CVe ist Teil eines übergeordneten Regelkreises für die Effektivspannung, durch den der Geschwindigkeitsfehler der Spannungsregler CVi ($i = 1, 2, 3$) kompensiert werden soll. Eine Effektivwertbildungseinrichtung 9 erzeugt anhand des Ausgangssignals u_c des Trennverstärkers 3 ein dem Effektivwert der Ausgangsspannung u_a entsprechendes Signal, das mittels eines Addierers 10 von einem vorgegebenen Sollwert U^* subtrahiert wird. Das Differenzsignal des Addierers 10 beaufschlagt den Effektivwertregler CVe , dessen Ausgang, wie schon angegeben, mit dem Multiplizierer 8 verbunden ist.

Eine Gleichstromvormagnetisierung des Ausgangstransformators Tr sowie Gleichstromunsymmetrien zwischen den drei Wechselrichtern werden mit Hilfe gesonderter Magnetisierungsstromregler $CH1$ bis $CH3$ der einzelnen Wechselrichter $WR1$ bis $WR3$ vermieden. Die Magnetisierungsstromregler werden mit der Differenz zwischen einem für alle Wechselrichter gemeinsam erzeugten sinusförmigen Sollsignal i_m^* und dem jeweiligen Magnetisierungsstromistsignal (i_{m1} für Wechselrichter $WR1$) beaufschlagt. Das Magnetisierungsstromistsignal wird als Differenz zwischen dem Ausgangsstrom des jeweiligen Wechselrichters und dem durch $3\bar{u}$ ($n = 3$) dividierten Strom der Sekundärwicklung Sw gewonnen. Ein dem Strom durch die Sekundärwicklung Sw entsprechendes Signal i_s wird mit Hilfe einer Strommeßstelle 11 gewonnen und mittels einer Teilungseinrichtung 34 durch $3\bar{u}$ geteilt. Strommeßstellen 12, 13 und 14 dienen der Gewinnung von Signalen i_{11} , i_{12} und i_{13} entsprechend den Ausgangsströmen der Wechselrichter $WR1$ bis $WR3$. In Addierern 15, 16, 17 wird das Ausgangssignal der Teilungseinrichtung 34 von den Signa-

len i_{11} , i_{12} bzw. i_{13} subtrahiert. Der Ausgang des Addierers 15 ist mit dem invertierten Eingang eines Addierers 18 im Wechselrichter *WR1* verbunden. Entsprechendes gilt für die Ausgänge der Addierer 16 und 17, obwohl es in der Zeichnung nicht dargestellt ist. Das den nicht invertierten Eingang des Addierers 18 beaufschlagende Sollsignal i_m wird mit Hilfe eines als Phasenschieber wirkendes Integrators 19 aus dem Spannungssollsignal u^* gewonnen. Auf diese Weise erhält man ein Sollsignal für die Magnetisierungsstromregler *CL1* bis *CL3*, das dem Spannungssollsignal u^* und damit den Ausgangsspannungen der Wechselrichter um 90° nacheilt. Die Amplitude des Sollsignals für den Magnetisierungsstrom kann beispielsweise mit Hilfe der Integrationszeitkonstanten des Integrators 19 eingestellt werden.

Zwei Lastverteilungsregler *CL1*, *CL2* dienen dazu, die symmetrische Lastaufteilung auf die drei Wechselrichter *WR1* bis *WR3* in bezug auf Wirk- und Blindleistung sicherzustellen. Zu diesem Zweck werden mittels eines Addierers 20 die den Ausgangsströmen entsprechenden Signale i_{11} , i_{12} und i_{13} aller drei Wechselrichter *WR1* bis *WR3* zu einem Summenstrom addiert. Der Summenstrom wird mittels einer Teilungseinrichtung 21 durch $n = 3$ geteilt. Der Ausgang der Teilungseinrichtung 21 ist mit dem Eingang eines schematisch dargestellten getasteten Doppelweggleichrichters 22 verbunden. Dessen Ausgang ist über ein Tiefpassfilter 23 Addierern 24 und 25 zugeführt, die als Soll-Ist-Vergleichsstellen den Lastverteilungsreglern *CL1* bzw. *CL2* vorgeschaltet sind. Die Signale i_{12} und i_{13} , die den Lastströmen der Wechselrichter *WR2* bzw. *WR3* entsprechen, sind an die Eingänge von getasteten Doppelweggleichrichtern 26 bzw. 27 geführt. Deren Ausgänge liegen über ein jeweiliges Tiefpassfilter 28, 29 an den invertierten Eingängen des Addierers 24 bzw. 25. Die Gleichrichter 22, 26 und 27 werden mittels eines Steuersignals getastet, das mit Hilfe eines als Phasenschieber dienenden Tiefpasses 30 und eines nachgeschalteten Komparators 31 aus dem Ausgangssignal des Referenzsignalgenerators *RS* gewonnen wird. Es handelt sich daher bei diesem Steuersignal um ein Rechtecksignal, dessen Phase gegenüber der Phase der Grundschwingung der Ausgangsspannung irgendeines der Wechselrichter *WR1* bis *WR3* um 45° bis 135° , vorzugsweise um 90° nacheilt. Die Gründe hierfür werden später anhand von Fig. 2 näher erläutert.

Am Ausgang des Tiefpassfilters 23 erhält man im wesentlichen ein Gleichstromsignal, dessen Höhe dem Betrag derjenigen Komponente des durch drei geteilten Summenstroms ($i_{11} + i_{12} + i_{13}$) entspricht, deren Phase gleich einer Bezugsphase, nämlich der Phase des die Gleichrichter 22, 26 und 27 tastenden Steuersignals ist. In entsprechender Weise erhält man an den Ausgängen der Tiefpassfilter 28 und 29 im wesentlichen Gleichstromsignale, deren Höhe dem Betrag der Bezugsphasenkomponente des Signals i_{12} bzw. i_{13} entspricht. Der Ausgang des Lastverteilungsreglers *CL1* ist mit einem Eingang des Multiplizierers 32, derjenige des Lastverteilungsreglers *CL2* mit einem Eingang eines Multiplizierers 33 verbunden. Der andere Eingang beider Multiplizierer 22 und 23 ist mit dem Ausgang des Multiplizierers 8 verbunden. Das Ausgangssignal des Lastverteilungsreglers *CL1* steuert die Amplitude des Spannungssollsignals u_1^* für den Wechselrichter *WR2*. Entsprechend steuert das Ausgangssignal des Lastverteilungsreglers *CL2* die Amplitude des Spannungssollsignals u_2^* für den Wechselrichter *WR3*. Durch diese Steuerung der Amplituden der Spannungssollsignale für die Wechselrichter *WR2* und *WR3* mittels der Lastverteilungs-

regler werden die Ausgangsströme dieser Wechselrichter so geregelt, daß die Bezugsphasenkomponenten ihrer Ausgangsströme nach Betrag und Phase mit der Bezugsphasenkomponente des durch drei geteilten Summenstroms übereinstimmen.

Das der Erfindung zugrundeliegende Prinzip sei nun anhand von Fig. 2 erläutert. Fig. 2(a) zeigt ein Ersatzschaltbild der Wechselrichteranordnung von Fig. 1. In diesem Ersatzschaltbild sind die Wechselrichter *WR1* bis *WR3* als Wechselspannungsquellen eingezeichnet, die die Spannungen u_1 , u_2 bzw. u_3 liefern. Bei der nachfolgenden Erläuterung wird zur Vereinfachung vorausgesetzt, daß die Filterinduktivitäten *L1*, *L2* und *L3* gleiche Werte besitzen. C' in Fig. 2 entspricht dem auf die Primärseite des Ausgangstransformators umgerechneten Filterkondensator *C* von Fig. 1. Entsprechend ist i_2 der auf die Primärseite umgerechnete Sekundärstrom des Ausgangstransformators. Mit i_{11} , i_{12} bzw. i_{13} sind die Ausgangsströme der Wechselrichter bezeichnet, und u_{L1} , u_{L2} bzw. u_{L3} stellen die Spannungsabfälle an den Filterinduktivitäten *L1* bis *L3* dar. u_1 ist die auf die Primärseite des Ausgangstransformators umgerechnete Ausgangsspannung der Wechselrichteranordnung.

Fig. 2(b) zeigt das zugehörige Zeigerdiagramm der Spannungen und der Ströme. Die Ausgangsspannungen u_1 bis u_3 der Wechselrichter sind, wie sich aus Fig. 1 ohne weiteres ergibt, gleichphasig. Der Betrag dieser Spannungen ist jedoch in dem mit der vorliegenden Erfindung auszuschließenden Fall der unsymmetrischen Lastaufteilung verschieden. Dabei ist in dem Zeigerdiagramm von Fig. 2(b) zur Vereinfachung der Erläuterung und ohne daß hierin irgendeine Beschränkung liegt, angenommen, daß der Betrag von u_1 gleich $1/3$ der Summe der Beträge von u_1 bis u_3 ist. Unter dieser Voraussetzung ist die erstrebte symmetrische Lastaufteilung dann erreicht, wenn die Beträge der Spannungen u_2 und u_3 jeweils gleich dem Betrag der Spannung u_1 geworden sind, alle Spannungen u_1 bis u_3 also nicht nur in der Phase sondern auch im Betrag übereinstimmen. Wie aus dem Zeigerdiagramm der Spannungen in Fig. 2(b) unmittelbar folgt, ist dieser Zustand der nach Betrag und Phase gleichen Spannungen u_1 bis u_3 dann erreicht, wenn die Spannungsabfälle u_{L2} und u_{L3} in bezug auf Betrag und Phase gleich dem Spannungsabfall u_{L1} geworden sind. Dies aber ist dann der Fall, wenn die Ströme i_{12} und i_{13} nach Betrag und Phase mit dem Strom i_{11} übereinstimmen.

Das Zeigerdiagramm der Ströme in Fig. 2(b) ergibt sich durch eine Drehung um 90° (entsprechend der Multiplikation mit $1/j\omega$) aus dem Zeigerdiagramm für die Spannungen u_{L1} bis u_{L3} . Es folgt aus den obigen Annahmen, daß in dem hier gewählten Beispielfall die Phase (Phasenwinkel θ_1) des Stroms i_{11} übereinstimmt mit der Phase der Stromsumme i_2 . Daraus folgt, daß im dargestellten Fall die symmetrische Lastaufteilung dann erreicht ist, wenn die Phasenwinkel θ_2 und θ_3 je gleich dem Phasenwinkel θ_1 geworden sind. Da die Spitzen der die Ströme i_{11} bis i_{13} in Fig. 2(b) repräsentierenden Zeiger zwangsläufig auf einer gemeinsamen, die Spannungszeiger u_1 bis u_3 und einem rechten Winkel schneidenden Geraden liegen, führt die Übereinstimmung der Phasenwinkel θ_1 bis θ_3 automatisch zur Übereinstimmung auch der Beträge der Ströme. Aus diesem Grunde ist auch die Bedingung übereinstimmender Phasenwinkel θ_1 bis θ_3 gleichbedeutend mit der Bedingung, daß die Beträge der Komponenten der Ströme i_{12} und i_{13} mit dem beliebigen Bezugsphasenwinkel θ_0 mit dem Betrag der entsprechenden Komponente des Stroms i_{11} übereinstimmen.

Die Bezugsphase bzw. der Bezugsphasenwinkel θ_0 ist beliebig, jedoch unter Ausschluß von $\theta_0 = 0$ (Richtung der Spannungszeiger u_1 bis u_3). Wie dem Zeigerdiagramm der Ströme in Fig. 2(b) leicht zu entnehmen ist, stimmen die Komponenten der Ströme i_{11} bis i_{13} mit dem Phasenwinkel $\theta_0 = 0$ überein, obwohl alle Ströme nach Betrag und Phase unterschiedlich sind. Ein nur wenig von 0 abweichender Bezugsphasenwinkel θ_0 im Zeigerdiagramm von Fig. 2(b) würde zu ungenauen Ergebnissen führen. Günstig ist deshalb eine der Phase der Ausgangsspannungen der Wechselrichter um etwa 45 bis 135° nacheilende Bezugsphase. Am besten eignet sich der in Fig. 2(b) dargestellte Bezugsphasenwinkel $\theta_0 = 90^\circ$, das heißt, auf die Phase der Wechselrichterausgangsspannungen, eine um 90° nacheilende Bezugsphase.

In der Schaltung von Fig. 1 kann die Bezugsphase durch Dimensionierung des Tiefpasses 30 eingestellt werden.

Abweichend von dem in Fig. 1 dargestellten Ausführungsbeispiel der Wechselrichteranordnung kann die Phasengleichheit zwischen den Ausgangsströmen i_{11} bis i_{13} auch auf eine andere, in den Zeichnungen nicht dargestellte Weise erfolgen. Die Elemente 20 bis 29 von Fig. 1 wären durch zwei Phasenvergleichseinrichtungen an sich bekannter Art zu ersetzen. Eine dieser Phasenvergleichseinrichtungen wäre eingangsseitig mit dem Signal i_{11} einerseits und dem Signal i_{13} andererseits zu beaufschlagen und mit dem Ausgang an den Eingang des Lastverteilungsreglers *CL2* anzuschließen. Die andere Phasenvergleichseinrichtung wäre eingangsseitig mit dem Signal i_{11} einerseits und dem Signal i_{12} andererseits zu beaufschlagen und mit dem Ausgang an den Eingang des Lastverteilungsreglers *CL1* anzuschließen. Die beiden Phasenvergleichseinrichtungen erzeugten dann ein Ausgangssignal entsprechend der Phasendifferenz zwischen den Signalen i_{11} und i_{13} einerseits bzw. den Signalen i_{11} und i_{12} andererseits. Bei der im übrigen (mit Ausnahme des Wegfalls der Elemente 30 und 31) gegenüber dem Aufbau von Fig. 1 unveränderten Schaltung würden die Lastverteilungsregler *CL1* und *CL2* sicherstellen, daß die Phasen aller Ausgangsströme der drei Wechselrichter übereinstimmen. Aus dem Vorhergehenden ergibt sich, daß dann gleichzeitig der Betrag jedes einzelnen dieser Ausgangsströme gleich 1/3 des Betrags des Summenstroms ist.

50

55

60

65

Nummer: 36 02 496
 Int. Cl. 4: H 02 M 7/44
 Anmeldetag: 28. Januar 1986
 Offenlegungstag: 30. Juli 1987

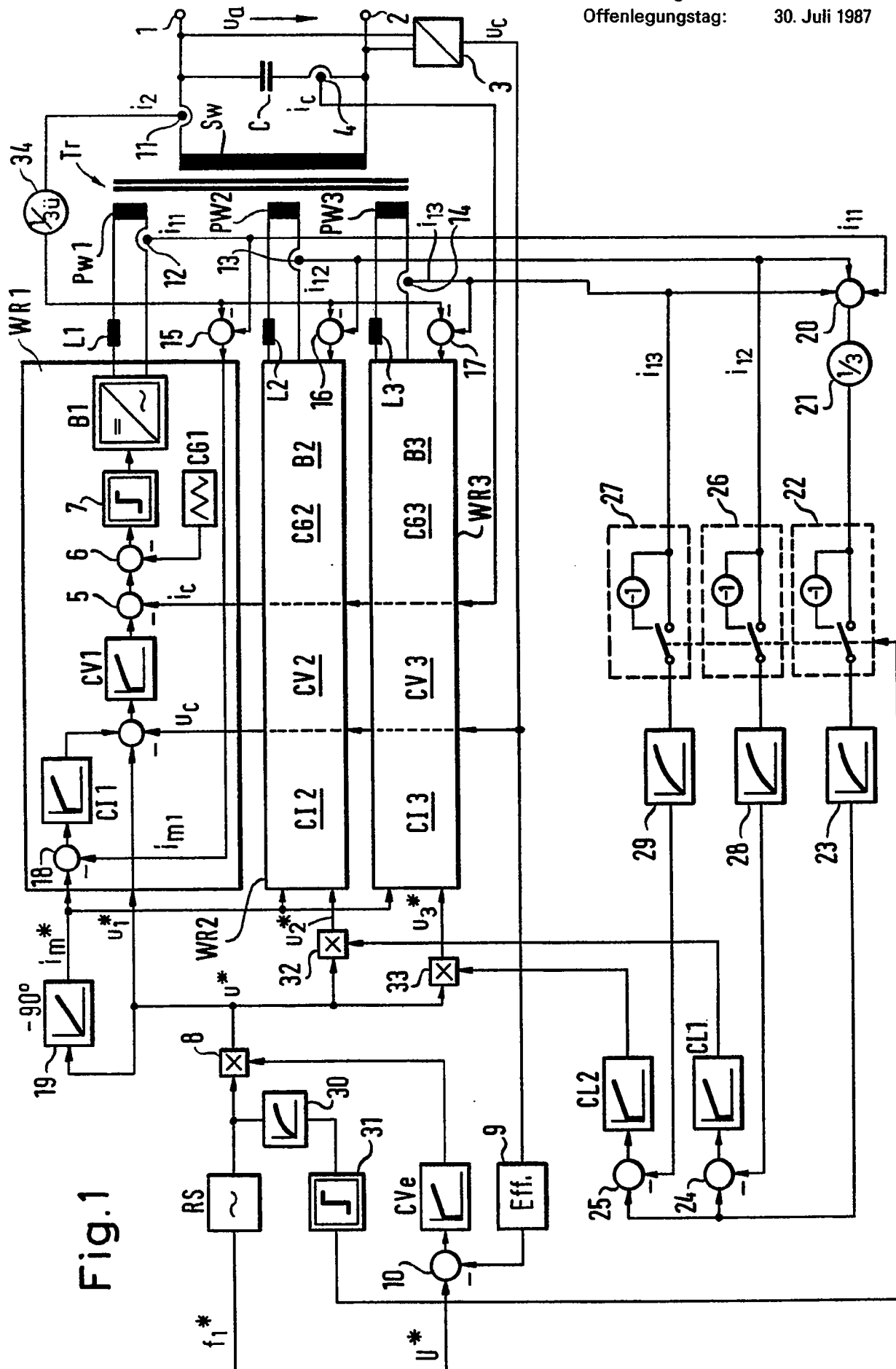
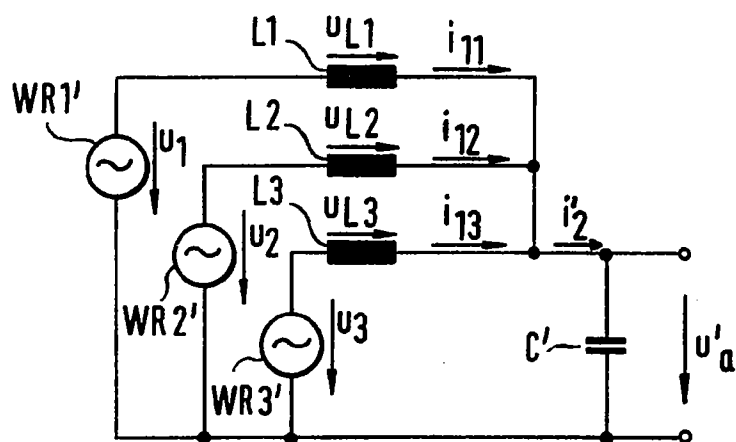


Fig. 1

Fig. 2 (a)



(b)

